

**KÖMÜRDEKİ NEMİN YANMAYA ETKİSİNİN
TEORİK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Neslihan AKBABA

Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği

Program: Enerji

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet ARISOY

MAYIS 2002

**KÖMÜRDEKİ NEMİN YANMAYA ETKİSİNİN
TEORİK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Neslihan AKBABA
0503991067

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 Mayıs 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 31 Mayıs 2002

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet ARISOY
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Feridun ÖZGÜÇ
Prof. Dr. Hisnü ATAKÜL

MAYIS 2002

ÖNSÖZ

Gelişen teknoloji ve rekabet kavramı, tüm dünyada araştırma ve geliştirme çalışmalarına verilen önemi arttırmış ve bu görevde önemli payı günümüz çağdaş üniversiteleri yüklenmiştir. Böylelikle karşılaşılan bilimsel problemler her geçen gün daha detaylı ve yeni problemleri de kapsayacak şekilde incelenebilmiştir.

Makine mühendisliğinde de geçmiş deneyimler ve araştırmalar ışığında, karşılaşılan bu problemler gerek deneysel gerekse matematiksel modeller kullanılarak çözülmeye çalışılmaktadır. Araştırmaların yoğunlaştığı konulardan biri de şüphesiz faz değişimi ısı ve kütle transferi mekanizmalarıdır. Güncel hayatta geniş bir uygulama alanı bulan, kömür ve kömürün yapısındaki mekanizmaların yanmaya olan etkisi konusunda çeşitli araştırmalar yapılmıştır.

Bu konuda yapılan çalışmalar deneysel verilerden öteye gitmemiştir. Gelişen teknolojinin de yardımı ile daha detaylı bir inceleme yapılarak kömürdeki nemin ve diğer parametrelerin yanmaya etkisinin incelenmesi bu çalışmanın temel konusunu oluşturmaktadır.

Bu konu üzerindeki çalışmada beni yönlendiren, teşvik eden ve değerli yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Arısoy ve Prof. Dr. Feridun Özgüç'e teşekkürü borç bilirim

Mayıs 2002

Neslihan Akbaba

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖZET	ix
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. MATEMATİKSEL MODEL	3
2.1. Genel	3
2.2. Sistem Seçimi ve Teorik İnceleme için Yapılan Kabuller	4
2.2.1. Sistem Seçimi	4
2.2.2. Teorik İnceleme için Yapılan Kabuller	4
2.3. Sistem Eşitlikleri	5
2.3.1. Ön Isıtma Evresi	5
2.3.2. Kuruma Evresi	6
2.3.2.1. Enerji Denklemleri	6
2.3.2.2. Kütle Korunum Denklemleri	7
2.4. Yorum	8
3. ÇÖZÜM YÖNTEMİ	11
3.1. Genel	11
3.2. Diferansiyel Denklemlerin Ayrıklaştırılması	11
3.2.1. Enerji Korunum Denklemleri	12
3.2.2. Kütle Korunum Denklemleri	13
3.3. Çözüm Yöntemi	14
3.3.1. TDMA Metodu	15
3.3.2. Gauss Seidel Nokta Metodu	16
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	19
4.1. Ön Isınma Evresi	19
4.2. Kuruma Evresi	21
4.2.1. Ortamın Isı Taşıma Katsayısının Sıcaklık ve Basıncı Etkisi	24
4.2.2. Kömürdeki Nem Oranının Sıcaklık ve Basıncı Etkisi	27
4.2.3. Kömür Geçirgenliğinin Basıncı Etkisi	30

4.2.4. Başlangıç Sıcaklık Şartının Buharlaştırma Cephelerinin İlerleme Hızına Etkisi	32
4.3. Sonuçlar	32
KAYNAKLAR	33
ÖZGEÇMİŞ	35
EK 1 Bilgisayar Programı (Diskette)	

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2 1 : Fiziksel Model	4
Şekil 4 1 : Sayısal ve analitik çözüm sonuçları nı n karşılaştırılması	20
Şekil 4 2 : Ön ısı nın evresi boyunca kömürdeki sıcaklık dağılımı nı n za mana göre değişimi	20
Şekil 4 3 : Ön ısı nın süresi nı n ortası taşı nı mkatsayısı na göre değişimi .	21
Şekil 4 4 : Çeşitli zamanlar için kömür içindeki sıcaklık dağılımları	21
Şekil 4 5 : Buharlaşma cephesi nı n ilerlemesi nı n za mana göre değişimi ...	22
Şekil 4 6a : $x=20.05$ mm deki basınç nı n za mana göre değişimi	22
Şekil 4 6b : $x=20.05$ mm deki basınç nı n buharlaşma cephesi ilerlerken değişimi	23
Şekil 4 7 : Kurutma bitiminde kömür içindeki basınç dağılımı	23
Şekil 4 8 : Herhangi bir anda kömür içindeki sıcaklık dağılımları na ısı taşı nı mkatsayısı nı n etkisi	24
Şekil 4 9 : Buharlaşma cephesi nı n ilerleme hızı na ısı taşı nı mkatsayısı nı n etkisi	24
Şekil 4 10a : $x=20.05$ mm deki basınç nı n za mana göre değişimi ne ısı taşı nı m katsayısı nı n etkisi	25
Şekil 4 10b : $x=20.05$ mm deki basınç nı n buharlaşma cephesi nı n konumuna göre değişimi ne ısı taşı nı mkatsayısı nı n etkisi	25
Şekil 4 11 : Kömür içindeki basınç dağılımı na ısı taşı nı mkatsayısı nı n etkisi .	26
Şekil 4 12 : Arayüzeydeki basınçlara ısı taşı nı mkatsayısı nı n etkisi ...	26
Şekil 4 13 : Herhangi bir andaki kömür içindeki sıcaklık dağılımları na kömürdeki nem oranı nı n etkisi	27
Şekil 4 14 : Buharlaşma cephesi nı n ilerleme hızı na kömürdeki nem oranı nı n etkisi	27
Şekil 4 15a : $x=20.05$ mm deki basınç nı n za mana göre değişimi ne kömürdeki nem oranı nı n etkisi	28
Şekil 4 15b : $x=20.05$ mm deki basınç nı n buharlaşma cephesi nı n konumuna göre değişimi ne kömürdeki nem oranı nı n etkisi	28
Şekil 4 16 : Kömür içindeki basınç dağılımları na kömürdeki nem oranı nı n etkisi	29
Şekil 4 17 : Arayüzeydeki basınçlara kömürdeki nem oranı nı n etkisi	29
Şekil 4 18a : $x=20.05$ mm deki basınç nı n za mana göre değişimi ne kömürün geçirgenliği nı n etkisi	30
Şekil 4 18b : $x=20.05$ mm deki basınç nı n buharlaşma cephesi nı n konumuna göre değişimi ne kömürün geçirgenliği nı n etkisi	30
Şekil 4 19 : Kömür içindeki basınç dağılımı na kömür geçirgenliği nı n etkisi ..	31
Şekil 4 20 : Arayüzeydeki basınçlara kömür geçirgenliği nı n etkisi ..	31
Şekil 4 21 : Başlangıç sıcaklık şartını n buharlaşma cephesi nı n ilerleme hızı na etkisi	32

SEMBOL LİSTESİ

c_{ps}	: Kömür ün özgül ısı sı
h	: Yüzeydeki ısı taşı nı m kat sayı sı
h_g	: Buharlaş ma ent al pi si
K	: Geçir genli k
k	: Isı ile ti m kat sayı sı
L	: Kömür yar ı deri nli ği
P	: Bas ı nç
q	: Taşı nı nı a geçen ısı m ık tar ı
R	: Gaz Sa bi ti
$S(t)$	: Buharlaş ma cep hesi ni n me sa fe si
T	: S ıcak l ık
t	: Za man
V	: Buhar ak ı ş h ız ı
W	: Ha ci m sel ne m o ra m
x	: M e sa fe
ϵ	: Po roz ite
μ	: V ız ko zit e
ρ	: Yo ğun l uk

Alt İ ndis ler

∞	: Fır ın Or ta m
l	: N e m
s	: Kö mür
v	: Buhar
0	: İl k ş art
1	: N e m li B öl ge
2	: Ku ru B öl ge

KÖMÜRDEKİ NEMİN YANMAYA ETKİSİNİN TEORİK İNCELENMESİ

ÖZET

Kömürleşme derecesi düştükçe kömür içerisindeki nem miktarı artmakta ve bazı genç kömürlerin yapısı ağırlıklı olarak sudan oluşmaktadır. 1995-1996 kışında İstanbul'da hava kirliliğini kontrol altına alabilmek için kente giren kömürlerin ısı değerleri, kül miktarı, parçacık boyutu, kükürt ve nem değerleri için bazı sınırlamalar getirilmiştir. Son 10-15 yılda İstanbul'da ağırlıklı olarak kullanılan ağaçlı kömürün nem içeriğinin yüksek olması nedeni ile, kömür neminin hava kirliliğine etkisi konusunda bu kömürün üreticileri ile yerel ve merkezi yöneticiler arasında bazı anlaşmazlıklar söz konusu olmuştur. Bu anlaşmazlıkların çözümlenebilmesi için kömürün içerdiği nemin yanmaya ve emisyonlara olan etkisi konusunda bilimsel veri ve yorumlara gerek duyulmuştur.

Bu çalışmada, kömürdeki nemin ve diğer parametrelerin yanmaya etkisi yapılan sayısal çözümle teorik olarak incelenmiştir. Bunun için kömürün yanma öncesi evresinde, içindeki sıcaklık ve basınç dağılımlarına etki eden parametreler için yazılan bilgisayar program yardımı ile parametrik çalışma yapılmıştır. Ortamın ısı taşınım katsayısı ve kömürdeki nem oranı kömürün içindeki sıcaklık dağılımlarına etki ederken, ortamın ısı taşınım katsayısı, kömürün nem oranı ve geçirgenlik değerleri basınç dağılımları üzerinde etkili olmaktadır. Elde edilen sayısal çözüm sonuçları, daha önce aynı konuda yapılan deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında kömürün parçalanmasına yol açarak daha iyi yanmayı sağlayan kritik bir nem değeri ne saptanmamış, kömürün geçirgenliğinin ve ortamın ısı taşınım katsayısının olay üzerinde kömürdeki nem oranından daha etkili olduğu bulunmuştur.

THEORETICAL STUDY OF THE EFFECT OF COAL MOISTURE IN COMBUSTION

SUMMARY

When the carbonization grade decreases, the moisture content of the coal increases and the structure of the young coals mainly consist of moisture. Some restrictions for the heating value, the ash content, piece dimensions, sulphur and the moisture content of the coals used in İstanbul, were put in practice to control the air pollution in the winter of 1995-1996. Because the wooded coal mainly used in İstanbul for the last 10-15 years has a high moisture content, a conflict between the coal producers and the local and the central governors was occurred about the effect of coal moisture on air pollution. Scientific data and comments about the effect of coal moisture on the combustion and the emissions are needed to give an end to this disagreement.

In this study, the effect of coal moisture in the combustion process is examined theoretically. Parametric studies are carried out by computer software for the parameters that affect the temperature and the pressure distributions inside the coal for the pre-combustion stages. The convective heat transfer coefficient and the moisture content of the coal affect the temperature distribution inside the coal; whereas the heat transfer coefficient, the moisture content and the permeability of the coal affect the pressure gradients. When the obtained numerical results in this study are compared with the results from the previous experimental studies on this subject; a critical moisture content that provides a better combustion by causing the coal to break up, does not come into existence and it is found that the permeability of the coal and the convective heat transfer coefficient are more effective on the pressure distributions than the moisture content of the coal.

BÖLÜM1. GİRİŞ

Kömürün bünyesinde bulunan nem kömürü kimyasal, fiziksel ve ekonomik açıdan çok önemli ölçülerde etkilemektedir. Suyun varlığı kömür reaktivitesi [1], gazlaşma mekanizmalarını, kuruma ve uçucu çıkışı [2], tutuşma sıcaklığını [3], ufalanma eğilimini, taşıma ekonomisini, yakılabilir sınırlarını ve diğer bazı özelliklerini etkileyebilmektedir.

Kömür bünyesinde bulunan nemin çok değişik şekillerde bulunması ve bunların birbirinden kesin olarak ayırmakta karşılaşılan güçlükler nedeni ile net bir değerlendirmek yapmak oldukça güç olmaktadır. Kömürde bulunan nem kimyasal ve fiziksel karakterde olmak üzere iki sınıfta toplanabilmek mümkündür. Fiziksel nem yanma sırasında daha çok kuruma, uçucu madde çıkışı ve yanma süreçlerini etkilerken, kimyasal nem daha sonraki aşamalarda devreye girmektedir. Kömürdeki nemin kaynakları Gauger [4] tarafından organik moleküllerin bozulması sonucu ortaya çıkan su (combined water), yüzeyde absorblanan su, kapiler yoğunlaşma suyu, çözülüş su ve inorganik bileşiklerin hidratasyon suyu olarak bilinmektedir.

Kömürleşme derecesi düştükçe kömür içerisindeki nem miktarı artmakta ve bazı genç kömürlerin yapısı ağırlıklı olarak sudan oluşmaktadır. 1995-1996 kışında İstanbul'da hava kirliliğini kontrol altına alabilmek için kente giren kömürlerin ısı değerleri, kül miktarı, parçacık boyutu, kükürt ve nemdeğerleri için bazı sınırlamalar getirilmiştir. Son 10-15 yılda İstanbul'da ağırlıklı olarak kullanılan ağaçlı kömürün nem içeriğinin yüksek olması nedeniyle, kömür neminin hava kirliliğine etkisi konusunda bu kömürün üreticileri ile yerel ve merkezi yöneticiler arasında bazı anlaşmazlıklar söz konusu olmuştur. Bu anlaşmazlıkların çözümlenebilmesi için kömürün içerdiği nemin yanmaya ve emisyonlara olan etkisi konusunda bilimsel veri ve yorumlara gerek duyulmuştur.

Kömürdeki nemin ve diğer parametrelerin yanmaya ve emisyonlara olan etkisinin incelenmesi için Prof. Dr. Ahmet Arısoy yönetiminde Mak. Müh. Mehmet Ekiçi tarafından İ. T. Ü. Makina Fakültesi Isı Tekniği Laboratuvarında deneysel çalışmalar

yapılmıştır. Bu çalışmada farklı nem oranlarına sahip ağaç kömürü silindirik bir sobada yakılarak veri yatak sıcaklıkları, baca basıncı, baca sıcaklığı, ve kömür akısı belli aralıklarla ölçülmüş, kömürdeki nemi n veri m ve emisyonlara etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda CO emisyonlarının, nem oranı %24'den %38'e giderken bir minimumdan geçtiği, %38.13 nem oranında ise maksimuma ulaştığı, verimin ise nem oranı azaldıkça yükseldiği görülmüştür. [5]

Bu çalışmada ise kömürdeki nenin yanmaya etkisinin incelenebilmesi için matematiksel bir model geliştirilmiş ve modelin belli şartlar ve kabuller altında sayısal çözümü yapılmış ve elde edilen sonuçlar mevcut deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışması giriş bölümünden sonra 3 bölüme ayrılmaktadır.

Bölüm 2’de çalışmaya esas teşkil eden fiziksel sistem ve bazı kabuller altında oluşturulan matematiksel model ve buna ait sistem eşitlikleri verilmiştir.

Bölüm 3’de mevcut sistem eşitliklerinin sayısal çözümünde kullanılan yöntem ve çözümde izlenecek adımlar ifade edilmiştir.

Bölüm 4’de ise EK1’de disket halinde verilmiş olan TurboC program yardımı ile yapılan parametrik incelemelerin sonuçları verilmiş, elde edilen sonuçların genel olarak değerlendirilmesi ve mevcut deneysel verilerle karşılaştırılması yapılmıştır.

BÖLÜM2. MATEMATİKSEL MODEL

2.1 Genel

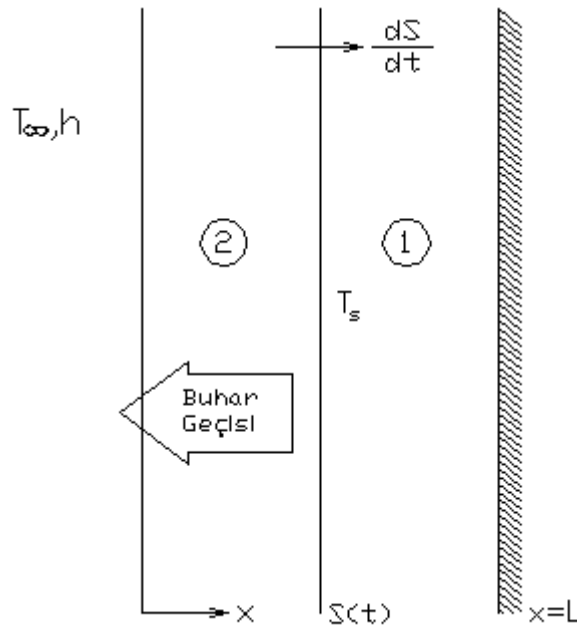
Faz değişimi ısı iletimisi geçişinin en bilinen problemlerinden biridir ve genelde Stefan problemi olarak anılmaktadır. Karşıklığına rağmen bu tip problemlerin çözümü analitik ve sayısal yollarla gerçekleştirilmiştir. Bilindiği üzere, Stefan probleminin analitik çözümü, problemin lineer olmasından dolayı çok sınırlı olmaktadır. Bu nedenle sayısal çözümler üzerinde yoğunlaşmıştır.

Poroz ortamlardaki eş zamanlı ısı ve kütle transferi mekanizmalarının modellenmesi mühendislikte gittikçe ilgi gören bir konudur. Bu konuda geniş kapsamlı bir matematik model Luikov [6] tarafından geliştirilmiştir. Fakat sıcaklık ve basınç dağılımlarını ifade eden kısmi diferansiyel denklemler oldukça karmaşıktır. Bu sistem uygulamada oldukça çok miktarda parametreye ihtiyaç duymaktadır ve pratikte bunu başarmak çoğu zaman imkansızdır. Bu yüzden literatürde son zamanlarda yer alan çalışmalar sistemi daha sınırlı yapıda tanımlamaya yöneliktir. Yapılan çalışmalar kolaylık açısından gruplayacak olursak üç ana grup karşımıza çıkmaktadır. Bunlar ıslak yüzey modeli, ilerleyen buharlaşma cephesi modeli ve difüzyon modelidir. Bu üç sınıflanmış model arasında yapılan karşılaştırmalar, ilerleyen cephe modelinin poroz malzemelerin zamana bağlı kuruma problemi için daha uygun olduğunu söylemektedir [7]. İlerleyen buharlaşma cephesi modeli sistemi kuru ve yaş bölge olmak üzere ikiye ayıran bir cephenin varlığını kabul etmektedir. Bu kabulden yola çıkılarak poroz ortamlarda kuruma sırasında oluşan sıcaklık ve basınç dağılımları sürekli rejim hali kabulü ile Gibson [8] tarafından yapılan analitik çözümle verilmektedir. Bu çalışmada ise kömür içinde oluşan basınç ve sıcaklık dağılımları zamana bağlı olarak çözülecektir.

2.2 Sistem Seçimi ve Teorik İnceleme İçin Yapılan Kabuller

2.2.1 Sistem Seçimi

Kömürdeki nemli ve diğer parametrelerin yanma öncesi evresinde sıcaklık ve basınç dağılımına dolayısı ile yanmaya ve emisyonlara olan etkisini inceleyebilmesi için öncelikle fiziksel modelin oluşturulması gerekmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, teorik inceleme deneysel verilere uygun olmalıdır. Bu nedenle hem deneysel hem de teorik incelemeye uygun bir sistem şematik olarak Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Fiziksel Model

Burada ızgaralı ocakta yanmaya maruz bırakılan $2L$ kalınlığında tek boyutta incelenebilecek kömür tanesi ele alınmaktadır. Bu kömür tanesini iki yüzeyinden T_∞ sıcaklığındaki gaz geçmekte ve $T(0,t)$ ve $T(2L,t)$ sıcaklığındaki kömür yüzeylerine taşınan ısı geçişi olmaktadır. Yüzeydeki ısı taşınım katsayısı “h” dir. Başlangıçta kömür homojen bir nem dağılımına sahiptir. İletimle ısı geçişi nedeniyle kömür içerisindeki nem buharlaşmakta ve poröz ortamı terk etmektedir.

2.2.2 Teorik İnceleme İçin Yapılan Kabuller

Problemi basitleştirmek için aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

1. Kütle ve enerji transferinin bir boyutlu olduğu kabul edilmektedir.

2. Kömür içerisinde yalnızca iletimle ısı geçişi olmaktadır.
3. Diferansiyel denklemler buharlaşma cephesinin “S(t)” mesafesinde olduğu düşünülerek yazılmaktadır. Buna göre S(t) mesafesine kadar kuru bölge(2), S(t) ile L arası ise belli bir nem değerinde yaş bölgedir(1).
4. Buharlaşma 373 K’de olmaktadır. Buharlaşma esnasında basınç artışı ndan dolayı buharlaşma sıcaklığında meydana gelecek artış ihmal edilmiştir.
5. Su buharının kütle akışının Darcy kanununa uygun olduğu kabul edilmiştir. Derişiklik farklılığı ndan ileri gelen kütle geçişi ihmal edilmiştir.
6. Su buharının kuru bölgede akışı sırasında sistemden çektiği ısı ihmal edilmiştir.
7. Poroz ortamın homojen olduğu kabul edilmektedir.

2.3 Sistem Eşitlikleri

Bölüm 2.2’de ifade edilen fiziksel model ve kabullere göre zamana bağlı ve tek boyutlu enerjinin korunumu ve kütle korunumu denklemleri kömürün yarı kalınlığı (L) için yazılır. Bu eşitlikler, ön ısı nma evresi ve kuruma evresi olmak üzere iki süreç için yazılmıştır.

2.3.1 Ön Isınma Evresi

Ön ısınma evresinde kömür tabakasının sıcaklığı buharlaşma sıcaklığının T_s altındadır. Bu nedenle kömür içinde faz değişimi olmamaktadır. Katı içindeki ısı transferi sadece saf ısı iletiminden ibarettir,

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T_1}{\partial t} = k_1 \cdot \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq L, \quad T_1 \leq T_s, \quad t \leq t_{pr} \quad (2.1)$$

(2.1) denkleminde, birinci terim birim zaman ve hacimdeki kömürde depo edilen enerjiyi; ikinci terim katı ortamdaki ısı iletimini göstermektedir. Burada t_{pr} ise tabakanın içindeki maksimum sıcaklığın T_s olması için gerekli zamanı göstermektedir. Kömür sol yüzeyinden ısı taşınımına maruz kaldığından dolayı bu zaman $x=0$ ’ da kömür yüzey sıcaklığının T_s sıcaklığına eriştiği andır. Kömürün yüzey sıcaklığı T_s değerine eşit olduğu anda faz değişimi başlanmaktadır. Bu nedenle, t_{pr} aynı zamanda kuruma evresinin başlangıç zamanını göstermektedir.

$$T_1|_{t=0} = T_0 \quad 0 \leq x \leq L \quad (2.2)$$

$$-k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = h[T_\infty - T_1(0, t)] \quad t \geq 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \quad t \geq 0 \quad (2.4)$$

Başlangıçta ($t=0$) kömürün $T_0=293K$ sıcaklığında olduğu, zaman ilerlerken yüzeyden taşınan ısı transferi olduğu ve $x=L$ 'de kömürün simetrik merkezi olması nedeni ile adyabatik sınır şartı kabulü ile (2.2), (2.3) ve (2.4) şartları yazılmıştır.

2.3.2 Kuruma Evresi

Kuruma esnasında, kömürün iki bölgeden oluştuğu düşünülmüştür. Buna göre Şekil 2.1'den de görüldüğü gibi $0 < x < S(t)$ arası kuru bölgeyi (2 bölge), $S(t) < x < L$ arası (1 bölge) ise belli bir nem dağılımındaki kömür bölgesini oluşturmaktadır. Kuru bölge, kömür tabakası tamamen kuruyana kadar zamana bağlı olarak artmakta ve kuruma bittiğinde tüm tabakayı kaplamaktadır.

2.3.2.1 Enerji Denklemleri

Kömür için kuru ve yaş bölge olmak üzere iki adet enerji korunum denklemi ve bunlara ait başlangıç ve sınır şartları yazılmalıdır. Kömürün yoğunluğunun (ρ_s) ve kömürün özgül ısısının (c_{ps}) sabit olduğu kabul edilerek eşitlikler aşağıda verilmiştir.

Kuru bölge

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T_2}{\partial t} = k_2 \cdot \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \quad 0 < x < S(t), \quad t \geq t_{pr} \quad (2.5)$$

$$-k_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = h[T_\infty - T_2(0, t)] \quad t \geq t_{pr} \quad (2.6)$$

Yaş Bölge

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T_1}{\partial t} = k_1 \cdot \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} \quad x > S(t), \quad t \geq t_{pr} \quad (2.7)$$

$$T_1 \Big|_{t=t_{pr}} = T_{10}(x) \quad 0 \leq x \leq L \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \quad t \geq t_{pr} \quad (2.9)$$

Burada $T_{10}(x)$ t_{pr} anında kömür içindeki sıcaklık dağılımıdır ve (2.1)-(2.4) denklemleri yardımı ile bulunmalıdır. Buharlaşma cephesinin olduğu $x = S(t)$ ’de aşağıdaki enerji dengesi denklemi arayüzey sınır şartı olarak yazılmalıdır,

$$-k_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=S(t)} = -k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=S(t)} + \rho_l \cdot W \cdot h_{fg} \cdot \frac{dS(t)}{dt} \quad (2.10)$$

(2.10) denkleminde, birinci terim buharlaşma cephesine iletilen gelen ısı miktarını; ikinci terim 2. bölgeye iletilen geçen ısı miktarını; üçüncü terim ise buharlaşma cephesindeki nemin buharlaşması için harcanan enerji miktarını göstermektedir.

Arayüzey sınır şartı olarak ayrıca sıcaklıkların sürekliliği yazılırsa;

$$T_1 \Big|_{x=S(t)} = T_2 \Big|_{x=S(t)} = T_s \quad t \geq t_{pr} \quad (2.11)$$

elde edilir.

2.3.2.2 Kütle Korunum Denklemi

Kuruma evresi boyunca su buharı akışı poröz kömür malzemesinin bünyesindeki boşluklardan taşınma olmaktadır. Su buharı için kuru bölgede yazılacak olan kütle korunum denklemi aşağıdaki gibidir,

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_v V_v)}{\partial x} = 0 \quad 0 \leq x \leq S(t), \quad t \geq t_{pr} \quad (2.12)$$

Burada birinci terim buhardaki kütle artması; ikinci terim ise buharın kütle akışını ifade etmektedir. Buharın kuru bölgedeki akışı Darcy kanunu yardımı ile ifade edilebilir,

$$V = -\frac{K}{\mu} \cdot \frac{\partial P_t}{\partial x} \quad (2.13)$$

Kömür içindeki boşluklarda havanın varolmadığı kabul edilirse burada P_t buharının basıncını göstermektedir. Su buharı ideal gaz olarak kabul edilirse,

$$\rho_v = \frac{P}{RT_s} \quad (2.14)$$

olarak yazılabilir. Burada buharının sıcaklığının buharlaşma sıcaklığında (T_s) olduğu ve akış boyunca buhar ile katı yüzey arasında bir ısı geçişi olmadığı kabul edilmiştir.

(2.12)-(2.14) denklemleri vasıtası ile kuru bölgedeki su buharının süreklilik denklemini aşağıdaki gibi bulunur:

$$\frac{\varepsilon \cdot \mu}{K} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(P \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad 0 \leq x \leq S(t), \quad t \in [0, t_{pr}] \quad (2.15)$$

$$P(0, t) = P_\infty \quad x = 0, \quad t \in [0, t_{pr}] \quad (2.16)$$

Buharlaşma cephesinin olduğu $x=S(t)$ 'de buhar akış hızı için Darcy kanunu ve buhar için ideal gaz kabulü ile aşağıdaki arayüzey sınır şartı yazılmalıdır,

$$(\rho_l \cdot W) \frac{dS}{dt} = -\rho_v \cdot V = \rho_v \cdot \frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.17)$$

(2.17) denklemi düzenlenecek olursa,

$$P \cdot \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\mu}{K} \cdot \frac{dS}{dt} \rho_l \cdot W \cdot R \cdot T_s \quad (2.18)$$

elde edilir.

2.4 Yorumlar

Fiziksel gerçeklerle problemin çözülebilmesi için $x=0$ 'da kömüre geçen ısı miktarı ara yüzeyden kuru ve ıslak bölgeye iletilen ısı miktarından fazla olmalıdır.

$$h(T_\infty - T) \Big|_{x=0} = -k_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=0} \leq -k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=S(t)} \quad (2.19)$$

Bu durumda $S > 0$ 'dır ve problemin sadece tek çözümü vardır. Yukarıdaki eşitlik olması durumunda kurumanın faz değişimi olarak çözümü yoktur ($S=0$) ve sadece ısı iletimi gerçekleşir. ($S < 0$) olması durumunda ise çözümü yoktur.

Özel durum olarak, yarı sonsuz katıda, sabit T_y yüzey sıcaklığında

$$q_{top}\Big|_{x=0} = h(T_{\infty} - T)\Big|_{x=0} \phi k_1(T_y - T_0) / \sqrt{\pi\alpha_1 t} \quad (2.20)$$

kurumanın gerek şartı olarak yazılabilir [9].

Yarı sonsuz ortamda iletim hızı (cephesi)

$$S(t) = 2\sqrt{\alpha_1 t} \quad (2.21)$$

olup faz değişimi halde bu ifadeye kömür parametreleri dahil edilirse, λ arayüzeyi belirleyen parametre olmak üzere

$$S(t) = 2\lambda\sqrt{\alpha_1 t} \quad (2.22)$$

olarak ifade edilebilir [10].

Başka biçimde ifade etmek gerekirse

$$c_{ps} \cdot \rho_s (T(0, t) - T_s) \phi W \cdot h_{fg} \cdot \rho_l \quad (2.23)$$

ıslak kömürün birim hacimindeki iç enerji artışı, suyu faz değiştirecek enerjiden büyük olacaktır. Buradan kabaca,

$$T(0, t) \phi T_s + W h_{fg} \rho_l / c_{ps} \rho_s \quad (2.24)$$

ifadesi kurumanın gerçekleşmesi için kontrol ölçütü olarak alınabilir.

BÖLÜM 3. ÇÖZÜM YÖNTEMİ

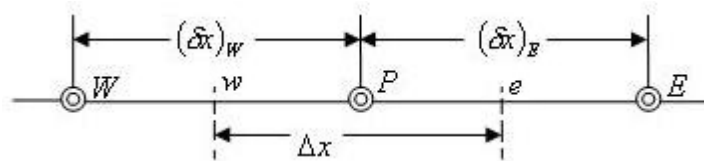
3.1 Genel

Kö mürdeki ne nın ve di ğer para netrelerin yan maya etkisini nın sabit koşullar altında incelenebil mesi için problem ayrıntılı olarak Böl üm 2’de analiz edil miştir. Bahsedilen proble mbasit ve sade olarak ma te matiksel model halinde ta nı mlan ması na ra ğın analitik tam çö zü müne eriş ne k hala çok zordur ve bazen i nkansız ol ma kta dır. Bu nedenle sayısal çö zü m y ö n t e m i kullanı l mıştır.

Böl üm 2’de verilen kütle ve enerji korunumu meş itlikleri son lu fark lar i m p l i c i t y ö n t e m i kullanılarak sayısal olarak çö zü l m ü ş t ü r [11]. Bu a ma ç la EK 1’de disket halinde verilen Turbo C progra mı yazıl mıştır.

3.2 Diferansiyel Denklemlerin Ayrıklaştırılması

Denklemlerin ayrıklaştırılması Patankar [11] tarafından tanı mlanan notasyona dayanan kontrol hac mi for mülasyonu ile yapılmıştır. Ayrıklaştırıl mış denklemleri elde et me k için kullanılacak olan dü ğ ü m noktaları grubu Şekil 3. 1’de gösteril miştir. Buna göre P ile gösterilen nokta hesap la ma nı n yapılacağı dü ğ ü m noktası olup W ve E noktaları ise ona ko nş u ol an dü ğ ü m noktaları nı göster ne k t e d i r (Burada E pozitif x yönünde do ğ u tarafı, W ise batı tarafıdır.). Keski ki çizgilerle gösterilen e ve w harfleri ise bahsedilen kontrol hac mi nin kontrol yüzeylerini göster ne k t e d i r. Bir boyutlu olarak ele alı nan problemler için y ve z yönlerinde bir i m k a l ı n l ı k farz edil miştir. Bu suretle kontrol hac mi nin hac mi $\Delta x \times 1 \times 1$ olarak gösterilir. Burada Δx alı nan kontrol hac mi ni n m e s a f e s i d i r.



Şekil 3.1. Dü ğ ü m Noktaları

3.2.1 Enerji Korunum Denklemleri

Eğer sistemi için verilen (2.1), (2.5), (2.7) eşitlikleri Şekil 3.1.'de verilen kontrol hacmi üzerinden konuma ve t ile $t + \Delta t$ arasındaki zaman aralığı için zamana göre integre edilirse,

$$\rho c \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx = \int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dt \quad (3.1)$$

halini alır. Düşümnoktasındaki sıcaklık değerini bütün kontrol hacmi boyunca sabit kaldığı farz edilirse (3.1) denkleminin sol tarafı aşağıdaki gibi açılır,

$$\rho c \int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial T}{\partial t} dt dx = \rho c \Delta x (T_p^1 - T_p^0) \quad (3.2)$$

burada T^0 , t anındaki eski sıcaklık değerlerini, T^1 ise $t + \Delta t$ anındaki yeni sıcaklık değerlerini göstermektedir.

Genel denklemin sağ tarafındaki $k \cdot \partial T / \partial x$ terimini de sonlu farklar yöntemi ne göre sıcaklıkların lineer olarak değiştiği kabulü ile açılırsa genel denklem

$$\rho c \Delta x (T_p^1 - T_p^0) = \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{k_e (T_E - T_p)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w (T_p - T_w)}{(\delta x)_w} \right] dt \quad (3.3)$$

halini alır. Bu noktada t anından $t + \Delta t$ anına kadar olan zaman aralığında T_p, T_w ve T_E sıcaklık değerlerinin nasıl değiştiğine dair bir kabul yapmak gerekmektedir. Burada birçok kabul yapılabilir. Eğer fully implicit kabulü yapılırsa, yani sıcaklıklar zaman aralığı boyunca bilinmeyen yeni değerler olarak alınırsa (3.3) denklemi şu şekli alır:

$$\rho c \Delta x (T_p^1 - T_p^0) = \frac{k_e (T_E^1 - T_p^1)}{(\delta x)_e} - \frac{k_w (T_p^1 - T_w^1)}{(\delta x)_w} \quad (3.4)$$

$t + \Delta t$ anındaki yeni değerleri gösteren 1 üst indisini kaldırıp denklemi düzenleyecek olursak genel denklem

$$\left(\frac{k_e}{(\delta x)_e} + \frac{k_w}{(\delta x)_w} + \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t} \right) T_p^1 = \frac{k_e}{(\delta x)_e} T_E^1 + \frac{k_w}{(\delta x)_w} T_w^1 + \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t} T_p^0 \quad (3.5)$$

olarak yazılabilir. (3.5) denklemi genel ayrıklaştırılmış cebirsel denklem şeklinde yazılırsa ve oluşturulan grid noktalarının aralarındaki mesafenin eşit olduğu göz önüne alınırsa $(\delta x)_e = (\delta x)_w = \Delta x$,

$$a_p T_p = a_E T_E + a_W T_W + b \quad (3.6)$$

katsayılar aşağıdaki gibi bulunur:

$$a_E = k_e / \Delta x \quad (3.7)$$

$$a_W = k_w / \Delta x \quad (3.8)$$

$$a_p^0 = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t} \quad (3.9)$$

$$b = a_p^0 T_p^0 \quad (3.10)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_p^0 \quad (3.11)$$

3.2.2 Kütle Korunum Denklemi

(2.15) eşitliği ile verilen buhara ait kütle korunum denklemi yapısı itibarı ile lineer olmayan bir diferansiyel denklem olduğundan cebrik sonlu farklar denklemine dönüştürülmesi belli kabuller altında yapılmak zorundadır.

Enerji denklemine benzer şekilde (2.15) eşitliğinin sol tarafı sonlu farklar denklemine çevrilebilir:

$$\int_w^e \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial P}{\partial t} dt dx = (P_p^1 - P_p^0) \Delta x \quad (3.12)$$

Genel denkleminin sağ tarafı ise aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\int_t^{t+\Delta t} \int_w^e \left(P \frac{\partial P}{\partial x} \right) dx dt = \int_t^{t+\Delta t} \left[P \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_e - P \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \Big|_w \right] dt \quad (3.13)$$

$$= \int_t^{t+\Delta t} \left[\left(\frac{P_E + P_P}{2} \right)^* \cdot \left(\frac{P_E - P_P}{\delta x_e} \right) - \left(\frac{P_W + P_P}{2} \right)^* \cdot \left(\frac{P_P - P_W}{\delta x_w} \right) \right] dt \quad (3.14)$$

burada kontrol yüzeylerindeki basınç değerleri iki düğüm noktasındaki değerlerin aritmetik ortalaması olarak alınmıştır [11]. Fully implicit kabulü ile tüm denklemi tekrar düzenleyip genel ayrıklaştırılmış cebirsel denklem şeklinde yazılırsa ve oluşturulan grid noktalarının aralarındaki mesafenin eşit olduğu göz önüne alınırsa $(\delta x)_e = (\delta x)_w = \Delta x$,

$$\frac{\mu \varepsilon}{K} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} [P_P^l - P_P^o] = \left(\frac{P_E + P_P}{2} \right)^* \left(\frac{P_E^l - P_P^l}{\Delta x} \right) - \left(\frac{P_W + P_P}{2} \right)^* \left(\frac{P_P^l - P_W^l}{\Delta x} \right) \quad (3.15)$$

katsayılar aşağıdaki gibi olur:

$$a_E = \left(\frac{P_E + P_P}{2} \right)^* \cdot \frac{1}{\Delta x} \quad (3.16)$$

$$a_W = \left(\frac{P_W + P_P}{2} \right)^* \cdot \frac{1}{\Delta x} \quad (3.17)$$

$$a_P^0 = \frac{\mu \varepsilon}{K} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3.18)$$

$$b = a_P^0 \cdot P_P^0 \quad (3.19)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_P^0 \quad (3.20)$$

(3.15) eşitliği (3.20) denklemine göre yeniden düzenlenecek olursa sonuç denklem aşağıdaki şekli alır:

$$\left[\left(\frac{P_E + P_P}{2} \right)^* \cdot \frac{1}{\Delta x} + \left(\frac{P_W + P_P}{2} \right)^* \cdot \frac{1}{\Delta x} + \frac{\mu \varepsilon}{K} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \right] \cdot P_P = \left[\left(\frac{P_E + P_P}{2} \right)^* \cdot \frac{1}{\Delta x} \right] \cdot P_E + \left[\left(\frac{P_W + P_P}{2} \right)^* \cdot \frac{1}{\Delta x} \right] \cdot P_W + \frac{\mu \varepsilon}{K} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} P_P^0 \quad (3.21)$$

3.3 Çözüm Yöntemi

Sistemi çin verilen diferansiyel eşitlikler Bölüm 3.2’de anlatıldığı gibi sonlu farklar denklemlerine dönüştürüldükten sonra kullanılacak olan çözüm yöntemi enerji ve kütle korunum denklemlerinde farklılık göstermektedir. Bunun nedeni denklemler arasındaki yapısal farklılıktır. Enerji korunum denklemini lineer cebirsel denklemini ken

kütle korunum denklemini lineer olmayan bir cebirsel denklemdir. Enerji denkleminin çözümünde Patankar [11] tarafından tanımlanan TDMA (Tri Diagonal- Matrix Algorithm) metodu, kütle korunum denkleminin çözümünde ise Gauss Seidel Nokta Metodu kullanılacaktır. Kullanılacak olan çözüm yöntemleri bundan sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

3.3.1. TDMA Metodu

Bir boyutlu hal için ayrılaştırılmış lineer diferansiyel denklemlerin çözümü Standart Gauss eliminasyon metodu kullanılarak elde edilebilir. Bu metod özellikle basit formdaki denklemler için daha uygun bir algoritmaya dönüştürülebilir. Bu algoritma TDMA metodu olarak isimlendirilmiştir [11] ve sadece tri diagonal katsayılar matrisi sağlayan bir boyutlu problemlere uygulanabilir.

Algoritmayı oluştururken uygunluk açısından Bölüm 3.2’de kullanılan notasyondan farklı bir notasyon kullanmak gerekmektedir. Şekil 3.1’deki düğüm noktalarının 1 ve N yüzeydeki noktaları göstermek üzere 1, 2, 3,N olarak numaralandığı farz edilirse genel ayrılaştırılmış denklemleri $i = 1$ ’ den $i = N$ e kadar aşağıdaki gibi yazılır:

$$a_i.T_i = b_i.T_{i+1} + c_i.T_{i-1} + d_i \quad (3.22)$$

Bu suretle ele alınan düğüm noktasındaki T_i sıcaklık değeri komşu düğüm noktalarındaki T_{i+1} ve T_{i-1} sıcaklık değerlerine bağlı olmaktadır. Sıcaklıklar için Patankar tarafından verilen bağıntılar yazılırsa,

$$T_i = Z_i.T_{i+1} + Q_i \quad (3.23)$$

$$T_{i-1} = Z_{i-1}.T_i + Q_{i-1} \quad (3.24)$$

elde edilir. (3.24) eşitliği (3.22) eşitliğinde yerine konulup düzenlenirse,

$$a_i.T_i = b_i.T_{i+1} + c_i.(Z_{i-1}.T_i + Q_{i-1}) + d_i \quad (3.25)$$

halini alır. Diğer bir deyişle Z_i ve Q_i katsayıları aşağıdaki eşitliklere karşılık gelmektedir:

$$Z_i = \frac{b_i}{a_i - c_i.Z_{i-1}} \quad (3.26)$$

$$Q_i = \frac{d_i + c_i \cdot Q_{i-1}}{a_i - c_i \cdot Z_{i-1}} \quad (3.27)$$

Birinci kontrol hacmi için katsayılar aşağıdaki gibi çıkar:

$$Z_1 = \frac{b_1}{a_1}, \quad Q_1 = \frac{d_1}{a_1} \quad (3.28)$$

Diğer taraftan son düğüm noktası için $b_N = 0$ olduğundan $Z_N = 0$ 'dır. Bu nedenle (3.23) eşitliğinden aşağıdaki sonuç elde edilir:

$$T_N = Q_N \quad (3.29)$$

Bu noktadan sonra (3.23) eşitliğine göre geri çevrim yapılırsa $T_{N-1}, T_{N-2}, \dots, T_3, T_2, T_1$ sıcaklık değerleri bulunur.

3.3.2 Gauss Seidel Nokta Metodu

Lineer olmayan denklemlerin çözümü TDMA metodu ile direk olarak yapılamamaktadır. Bu durumda genel olarak aşağıdaki adımlarla uygulanan iteratif bir çözüm yönteminin kullanılması gerekmektedir.

1. Tüm düğüm noktaları için mevcut bağımlı değişkene tahmini değerler atanır.
2. Tahmini değerlerle ayrılaştırılmış denklemlerdeki katsayıların geçici değerleri hesaplanır.
3. Her düğüm noktası için yazılmış cebri denklemler çözülerek düğüm noktalarında yeni bağımlı değişken değerleri bulunur.
4. Elde edilen yeni değerlerle 2. adıma dönülüp aynı adımlar iki iterasyon adımı arasında bulunan değerlerin farkı belirlenen yakınsama kriterini sağlayana kadar uygulanır.

İteratif metodların en basiti değişkenlerin değerlerini her düğüm noktasınıntek tek ziyaret edilerek hesaplandığı Gauss Seidel metodudur. Her düğüm noktası ziyaret edildiğinde ilgili değerler bilgisayar belleğinde saklanır. Ayrılaştırılmış denklemler genel olarak aşağıda yazacak olursak,

$$a_p \cdot P_p = \sum a_{nb} \cdot P_{nb} + b \quad (3.30)$$

burada nb komşu düğüm noktasını göstermektedir. Bulunan düğüm noktası için sıcaklık aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P_p = \frac{\sum a_{nb} \cdot P_{nb}^* + b}{a_p} \quad (3.31)$$

burada P_{nb}^* komşu düğüm noktası için bilgisayar belleğinde mevcut değeri göstermektedir. Bulunan iterasyon adında daha önce ziyaret edilmiş düğüm noktalarında P_{nb}^* hesaplanmış bir değerdir. Henüz ziyaret edilmemiş düğüm noktalarındaki P_{nb}^* değeri ise bir önceki iterasyon adında elde edilmiş değerlerdir. Tüm düğüm noktaları sıra ile tek tek ziyaret edildiğinde iterasyon tamamlanmış olur.

BÖLÜM 4. SONUÇLAR VE İRDELEME

Bu bölümde kömürdeki nemin ve diğer parametrelerin yanma öncesi evresinde kömürün içinde oluşan basınç ve sıcaklık dağılımlarına etkisi mukayeseli olarak verilmiştir. EK1’de disket halinde verilen TurboC program yardımı ile yapılan parametrik incelemelerin sonuçları aşağıda kömürün yanma öncesiindeki iki evresi için verilmiştir.

4.1 Ön Isınma Evresi

Ön ısınma evresi sadece katı içindeki bir boyutlu geçici rejimdeki ısı iletimi problemi olduğundan sayısal çözümü oldukça basittir ve analitik çözümü de literatürde yer almaktadır. Bu bölümde tarafımızdan yapılan sayısal çözümün sonuçları analitik tam çözüm sonuçları ile karşılaştırılması olarak verilecektir.

Taşınımı düz levha hali için zamana bağlı tek boyutlu ısı iletiminin tam analitik çözümü aşağıdaki biçimdedir [9].

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \exp(-\zeta_n^2 \cdot Fo) \cos(\zeta_n \cdot x^*) \quad (4.1)$$

burada θ^* boyutsuz sıcaklık olup $\frac{T(x,t)-T_{\infty}}{T(x,0)-T_{\infty}}$ değerine eşittir, $Fo = \alpha t / L^2$ ve

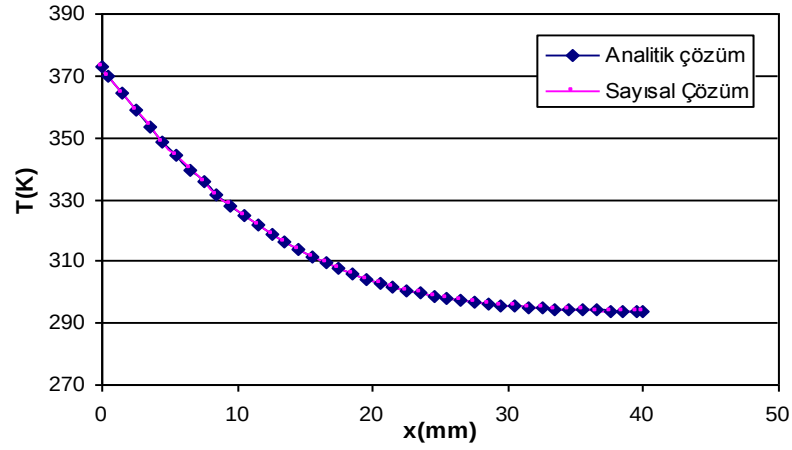
C_n katsayısı

$$C_n = \frac{4 \cdot \sin \zeta_n}{2\zeta_n + \sin(2\zeta_n)} \quad (4.2)$$

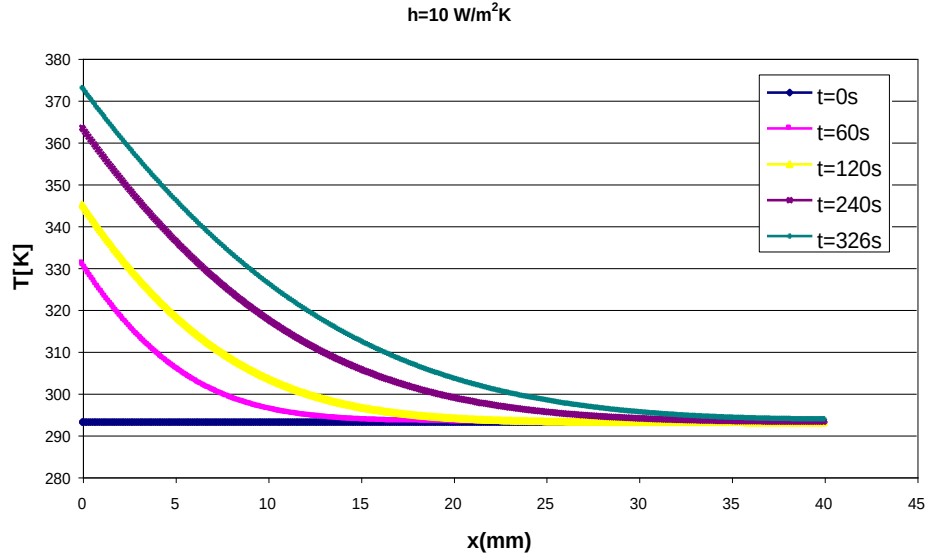
olmaktadır. ζ_n ’in ayrık değerleri (öz değerleri) aşağıdaki transandental denklemin artı kökleri dir.

$$\zeta_n \cdot \tan \zeta_n = Bi \quad (4.3)$$

Bu eşitliğin ilk dört kökü verilmiştir [9].



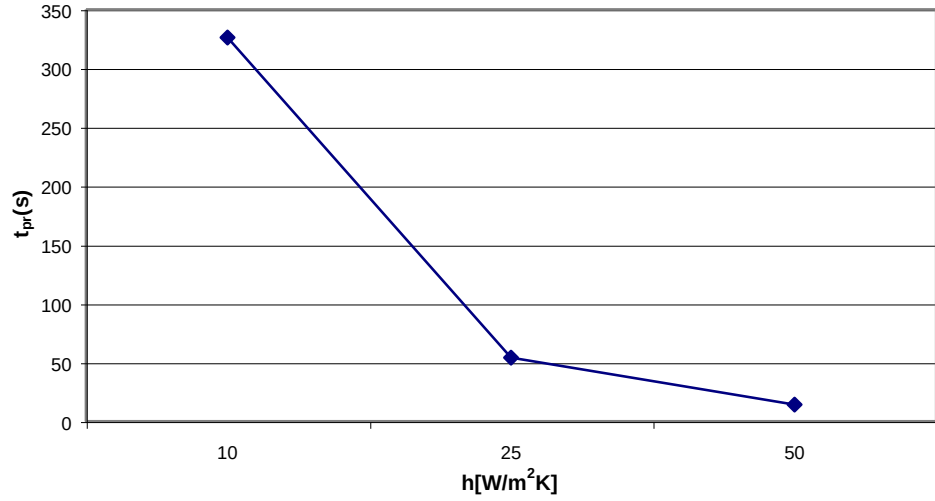
Şekil 4.1 Sayısal ve analitik çözüm sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.2 Ön ısınnma evresi boyunca kömürdeki sıcaklık dağılımının zamanla göre değişimi

Şekil 4.1 ön ısınnma evresi sonundaki tabakadaki sıcaklıkların konuma göre değişimini analitik ve sayısal çözümle karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Görüldüğü gibi elde edilen sayısal çözüm sonuçları ile analitikta mçözüm sonuçları tam bir uyum içerisinde.

Şekil 4.2’de ise ön ısınnma evresinde kömür içindeki sıcaklık dağılımı belli zaman aralıkları için verilmiştir. Burada $t=326s$ ön ısınnma evresinin bitiş zamanıdır diğer bir deyişle yüzey sıcaklığının T_s sıcaklığına geldiği ve faz değişiminin oluşmaya başladığı andır.

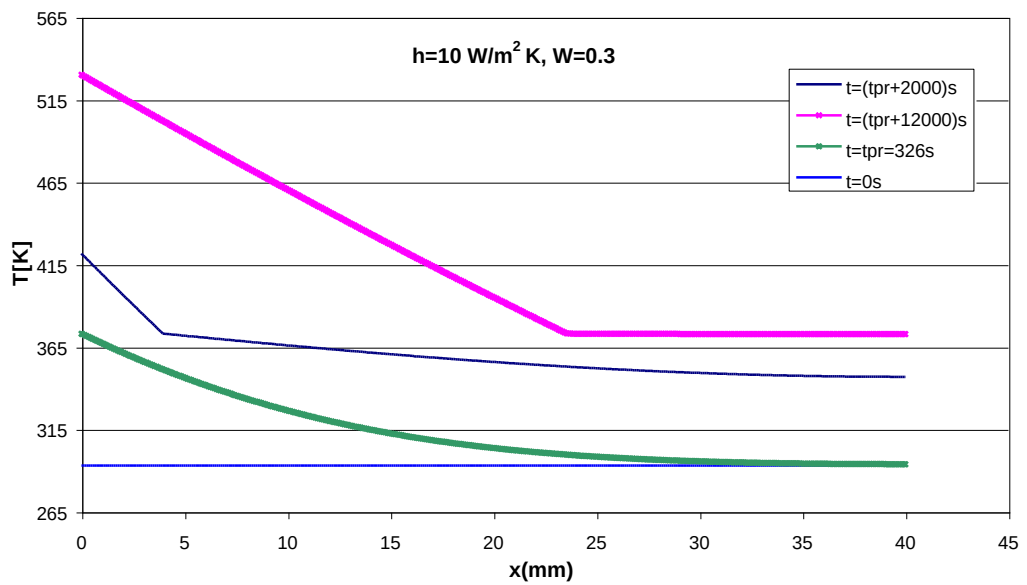


Şekil 4.3 Ön ısıtma süresi nin ortam ısı taşıma katsayısına göre değışi mi

Ön ısıtma süresi B sayısının dolayısı ile ısı taşıma katsayısının (h) bir fonksiyonudur. Şekil 4.3’de görüldüğü gibi ortam ısı taşıma katsayısı arttıkça ön ısıtma süresi hızla azalmaktadır.

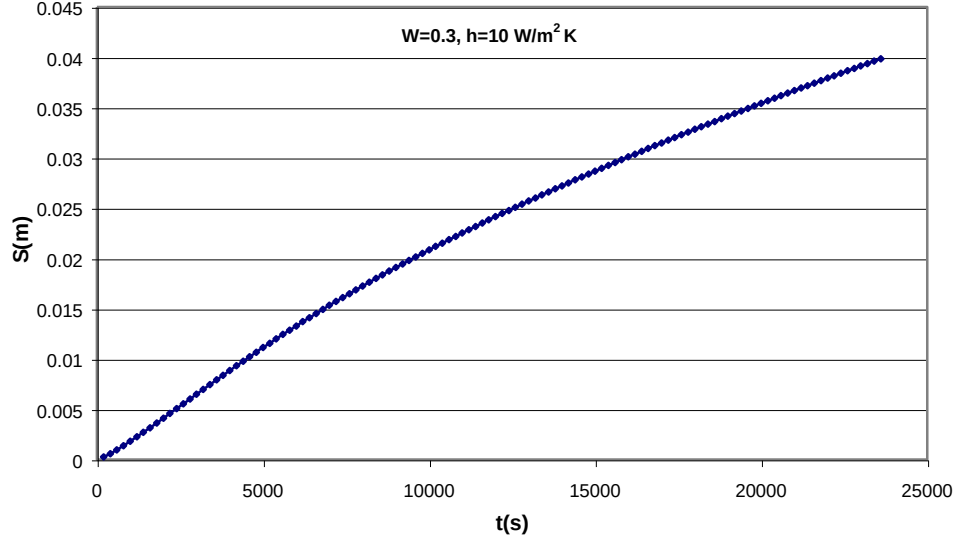
4.2 Kuruma Evresi

Daha önceki bölümlerde ifade edildiği gibi kuruma evresi diğer bir deyişle kömür ün bünyesindeki nem e ait faz değışi minin görüldüğü safha kömür tabakasının yüzey sıcaklığının T_s olduğu anda başlamaktadır. Bu bölümde kömür tabakasının içi ndeki sıcaklık ve basınç dağılımlarına etki eden parametreler incelenecektir.



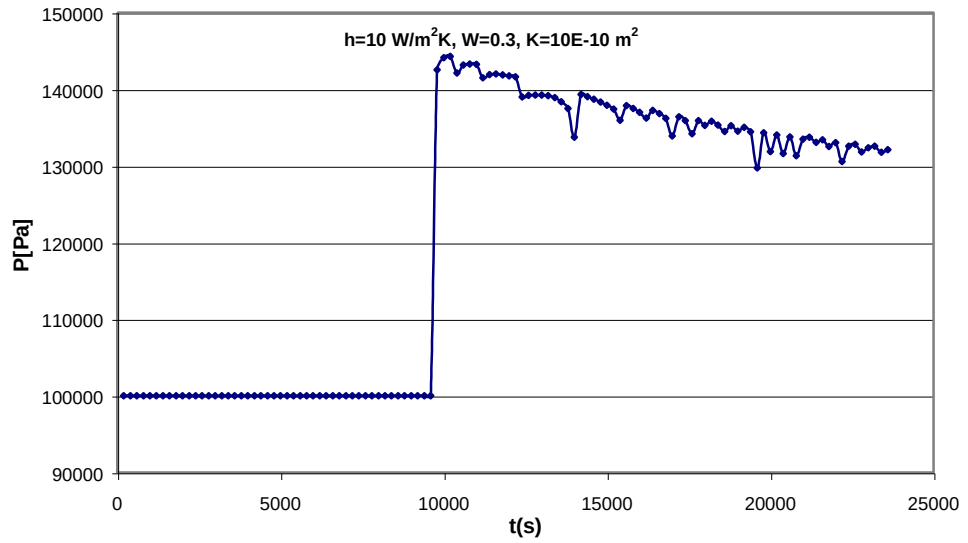
Şekil 4.4 Çeşitli zamanlar için kömür içi ndeki sıcaklık dağılımları

Şekil 4.4 kuruma evresindeki çeşitli zaman adımları için tabakadaki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Şekilden zamana ve konuma bağlı olarak kayan bir buharlaşma cephesinin varlığı görülmektedir.

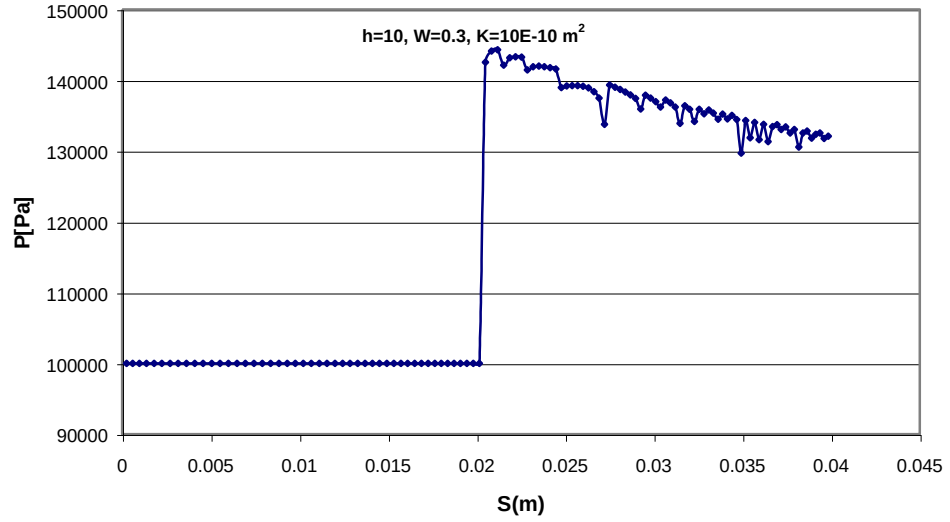


Şekil 4.5 Buharlaşma cephesinin ilerlemesinin zamana göre değişimi

Şekil 4.5 buharlaşma cephesinin ilerleme hızının zamana göre azalan bir eğilime gittiğini göstermektedir. Bunun nedeni buharlaşma cephesine gelen toplam ısı miktarının buharlaşma cephesi ilerlerken kuru bölgenin iletim direncinin artmasından dolayı azalmasıdır.

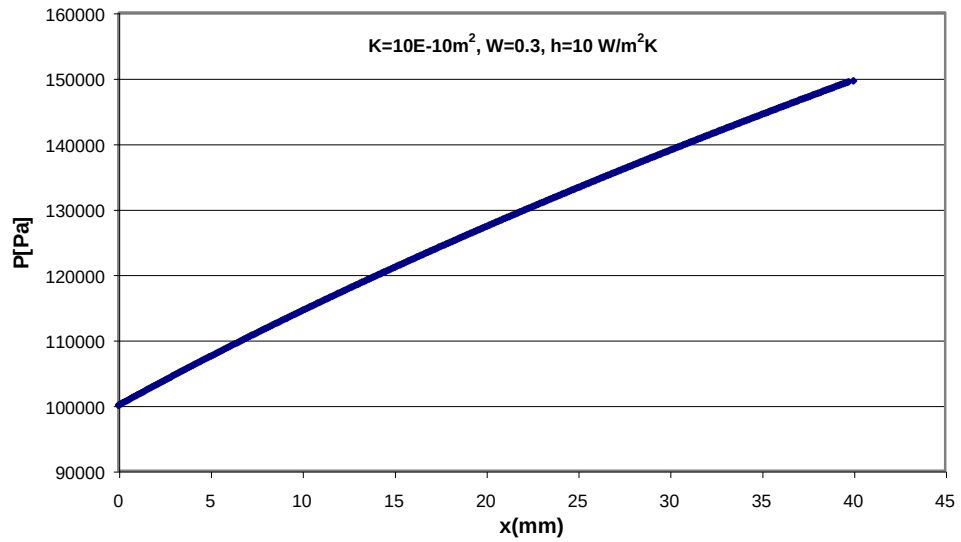


Şekil 4.6a $x=20.05 \text{ mm}$ 'deki basıncın zamana göre değişimi



Şekil 4.6b $x=20.05 \text{ mm}$ deki basıncın buharlaşma cephesi ilerlerken değişimi

Şekil 4.6a ve Şekil 4.6b bir noktadaki basıncın zamanla ve buharlaşma cephesinin konumuna göre değişimini göstermektedir. Buna göre buharlaşma cephesi noktaya gelmeden önce o noktada buhar olmadığı için basınç atmosfer basıncındadır. Buharlaşma cephesi noktadan üzerinden geçtikten sonra basınç poröz ortamın direnci nedeniyle maksimum değeri ne ulaşmakta ve daha sonra zamanla azalmaktadır.

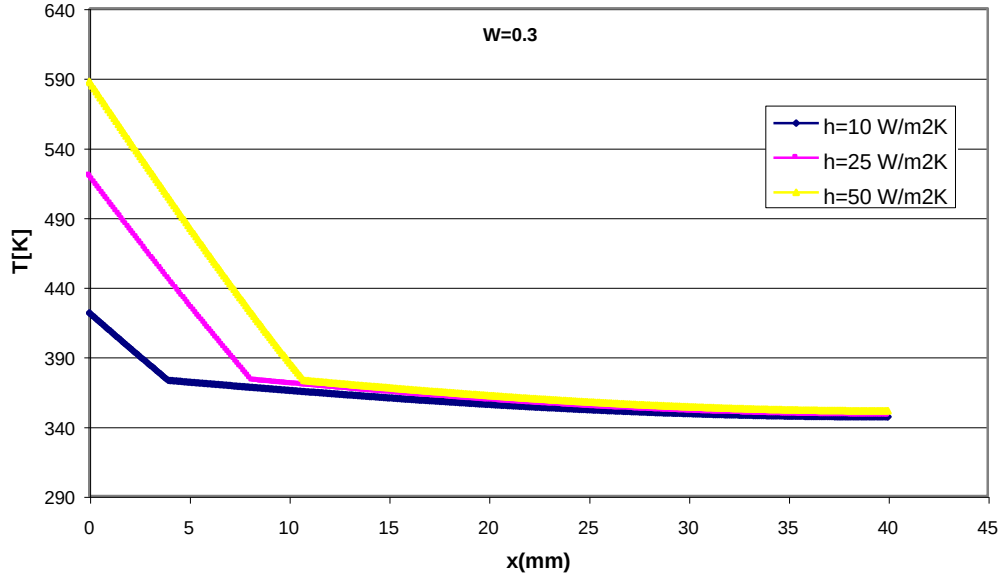


Şekil 4.7 Kurutma bitiminde kömür içindeki basınç dağılımı

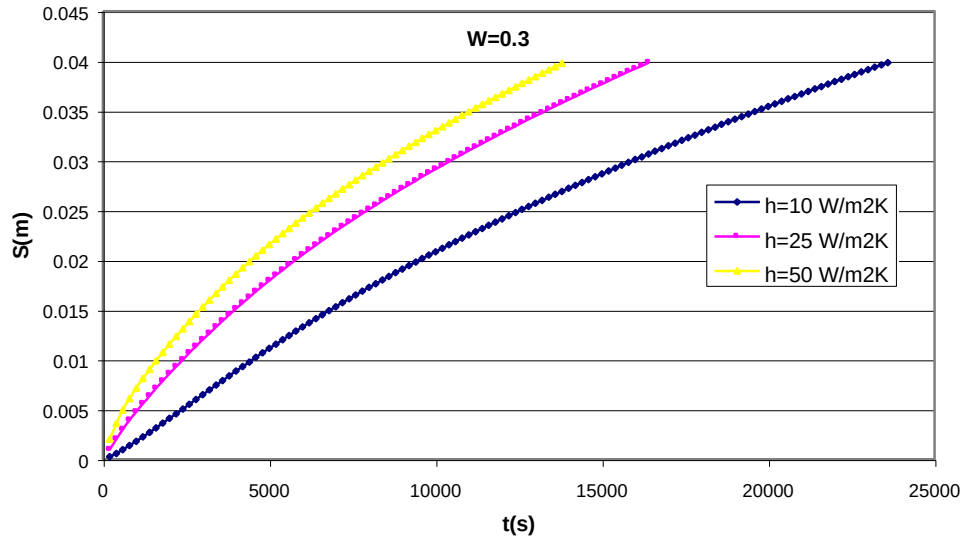
Şekil 4.7 Kurutma bitiminde kömürdeki basınç dağılımının konuma göre değişimini göstermektedir. Basıncılar cephe ilerledikçe artmaktadır.

4.2.1 Ortamın Isı Taşıma Katsayısının Sıcaklık ve Basıncı Etkisi

Kömür içindeki sıcaklık dağılımlarına etki eden parametrelerden bir tanesi ortamın ısı taşıma katsayısıdır. Şekil 4.8’de çeşitli h değerleri için herhangi bir andaki sıcaklık dağılımları verilmektedir. Buna göre ısı taşıma katsayısı arttıkça kömüre gelen toplam ısı miktarı arttığından sıcaklık cephesinin ve buharlaşma cephesinin ilerlemesi daha hızlı olmaktadır. (Şekil 4.8, Şekil 4.9)

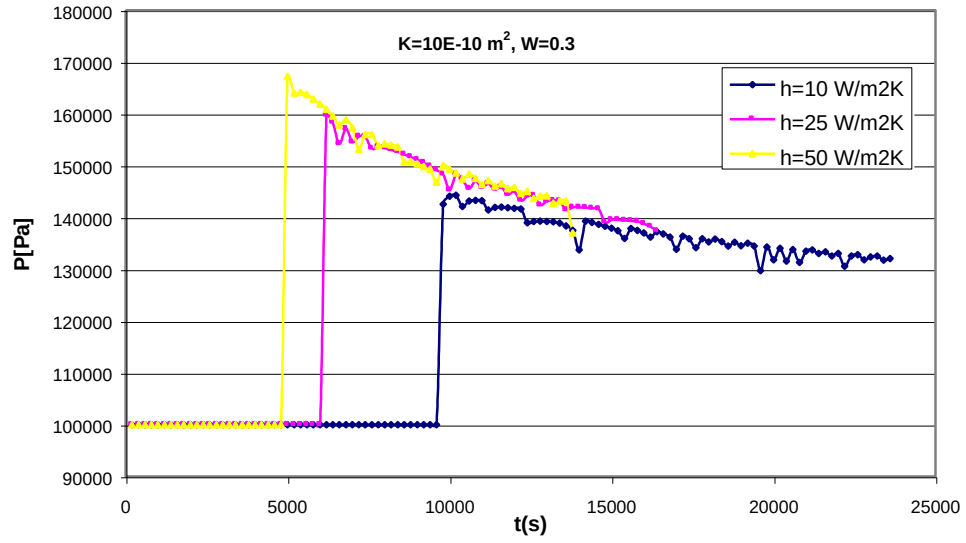


Şekil 4.8 Herhangi bir anda kömür içindeki sıcaklık dağılımlarına ısı taşıma katsayısının etkisi

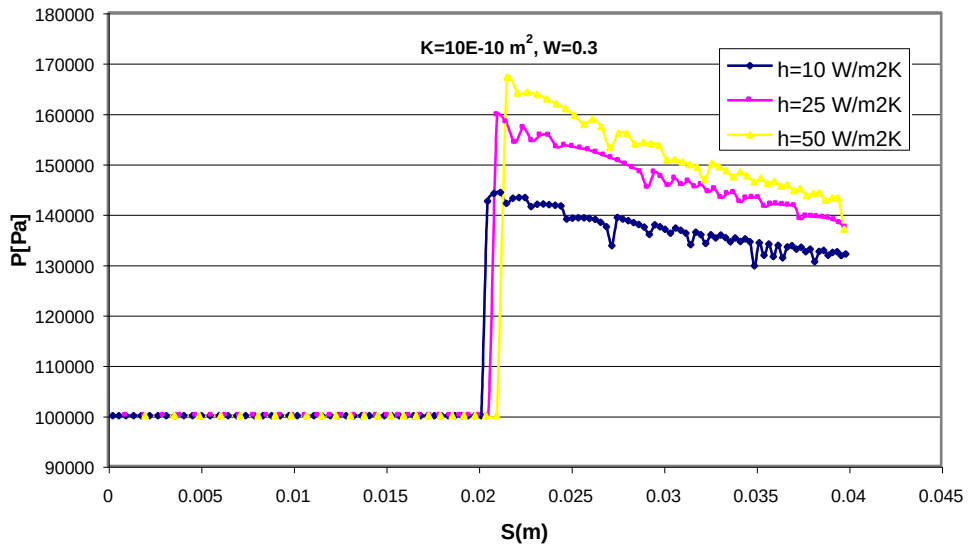


Şekil 4.9 Buharlaşma cephesinin ilerleme hızına ısı taşıma katsayısının etkisi

Şekil 4.9 aynı zamanda çeşitli ısı taşıma katsayıları değerleri için kurutma sürelerini vermektedir.

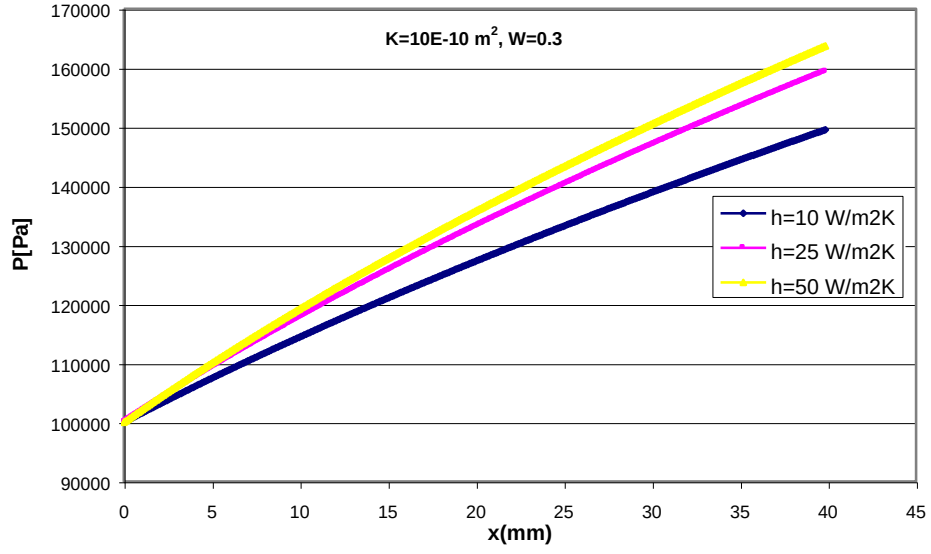


Şekil 4.10a $x=20.05 \text{ mm}$ 'deki basıncın zamanla göre değişimine ısı taşıma katsayısının etkisi

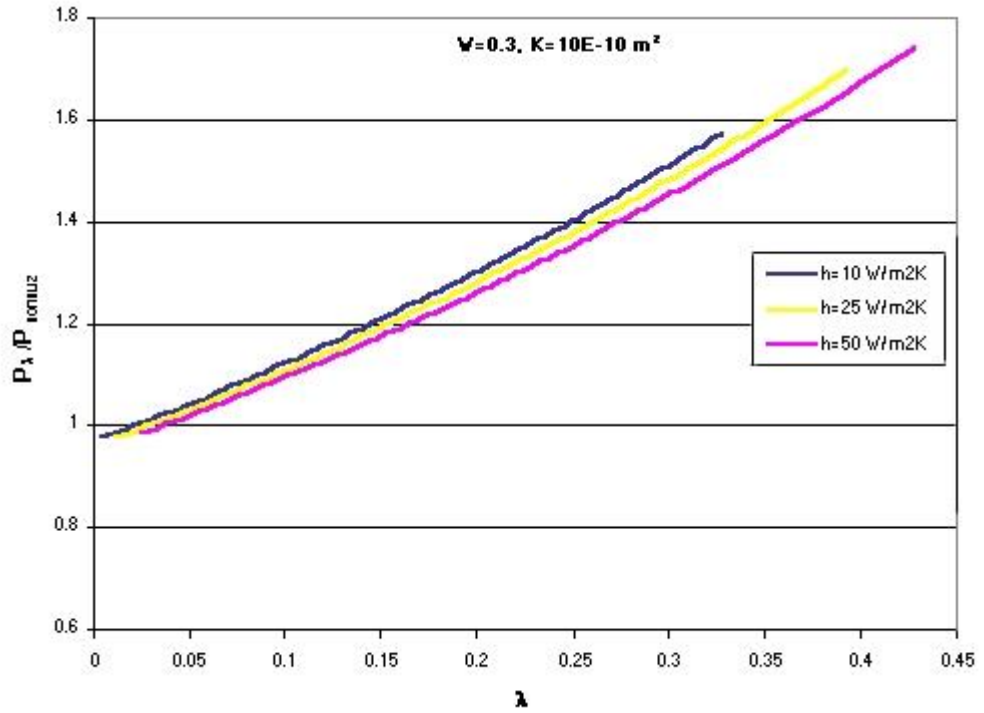


Şekil 4.10b $x=20.05 \text{ mm}$ 'deki basıncın buharlaşma cephesinin konumuna göre değişimine ısı taşıma katsayısının etkisi

Ortama ısı taşıma katsayısı arttıkça gelen toplama miktarı arttığından buharlaşma cephesinin ilerleme hızı artmaktadır. Buda buharlaşan nem miktarında artmaya neden olmaktadır. Artan buhar miktarı ise cephede oluşan basınçları arttırmaktadır. (Şekil 4.10a, 4.10b, 4.11)



Şekil 4.11 Kömür içindeki basınç dağılımına ısı taşıma katsayısının etkisi

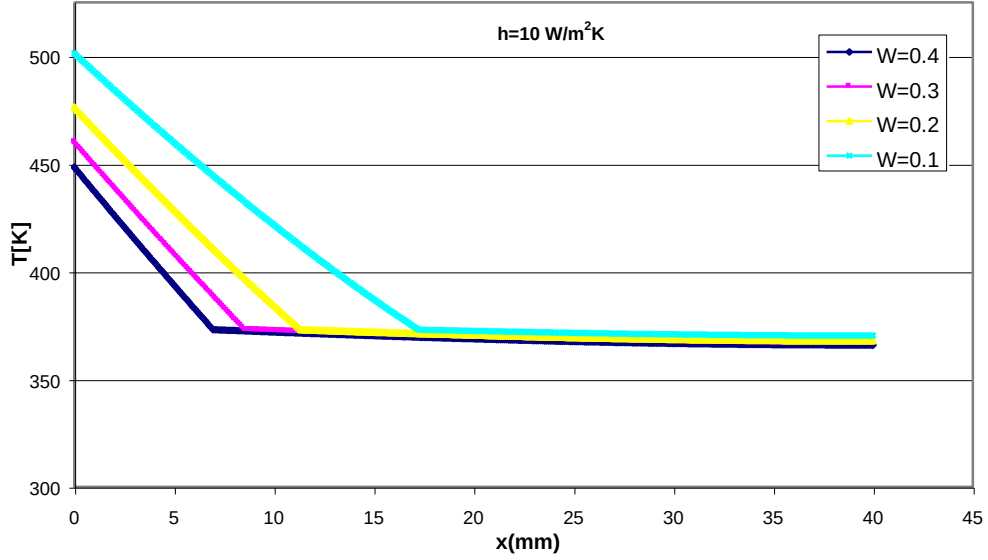


Şekil 4.12 Arayüzeydeki basınçlara ısı taşıma katsayısının etkisi

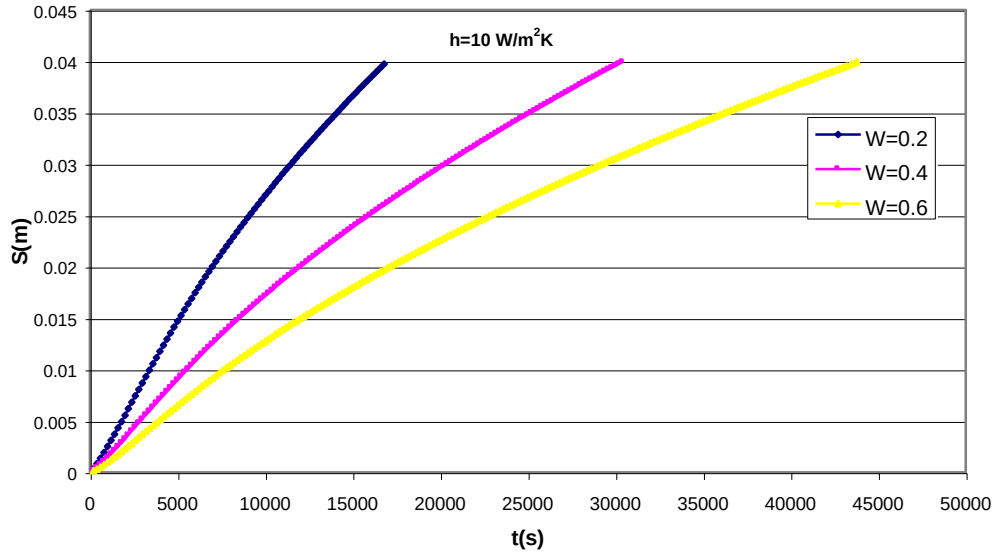
Şekil 4.12 Arayüzeydeki basınçlara ısı taşıma katsayısının etkisini göstermektedir. Burada λ sıcaklık cephesinin ilerleme hızına göre buharlaşma cephesinin ilerleme hızıdır. Görüldüğü gibi ısı taşıma katsayısı arttıkça buharlaşma cephesinin ilerleme hızı ve aynı zamanda basınçlar artmaktadır.

4.2.2 Kömürdeki Nem Oranının Sıcaklık ve Basıncı Etkisi

Şekil 4.13’de kömür içindeki sıcaklık dağılımına kömürdeki nem oranının etkisi ele alınmaktadır. Nem oranı azaldıkça sıcaklık cephesinin ilerleme hızı buharlaşmaya gidene kadar azaldığından dolayı artmaktadır.



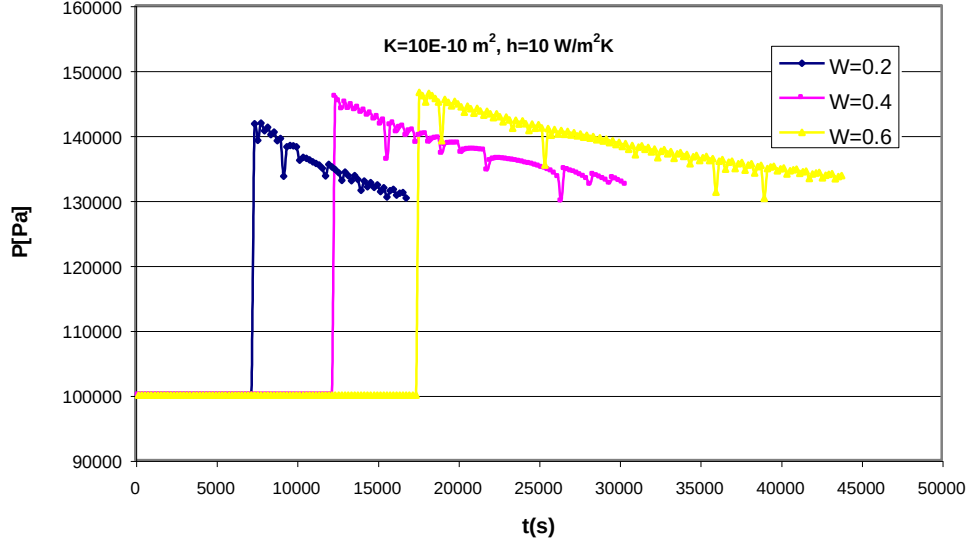
Şekil 4.13 Herhangi bir andaki kömür içindeki sıcaklık dağılımına kömürdeki nem oranının etkisi



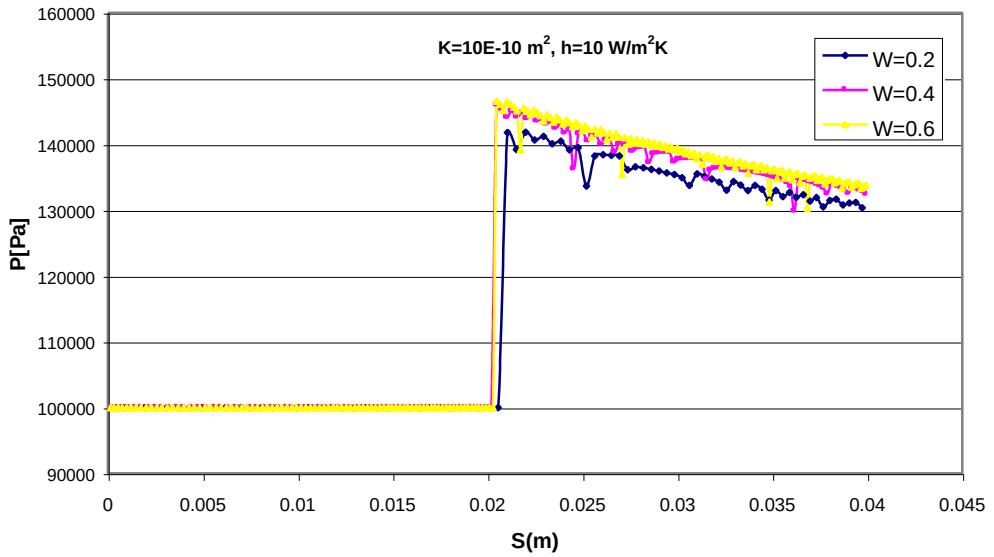
Şekil 4.14 Buharlaşma cephesinin ilerleme hızına kömürdeki nem oranının etkisi

Şekil 4.14 ise buharlaşma cephesinin ilerleme hızına kömürdeki nem oranının etkisini göstermektedir. Nem oranı arttıkça buharlaşma için harcanan enerji miktarı

arttığından buharlaşma cephesinin ilerleme hızı azalmakta ve kurutma süreleri artmaktadır. Bu grafik aynı zamanda farklı nem oranlarındaki kömürdeki nem oranının etkisi vermektedir.

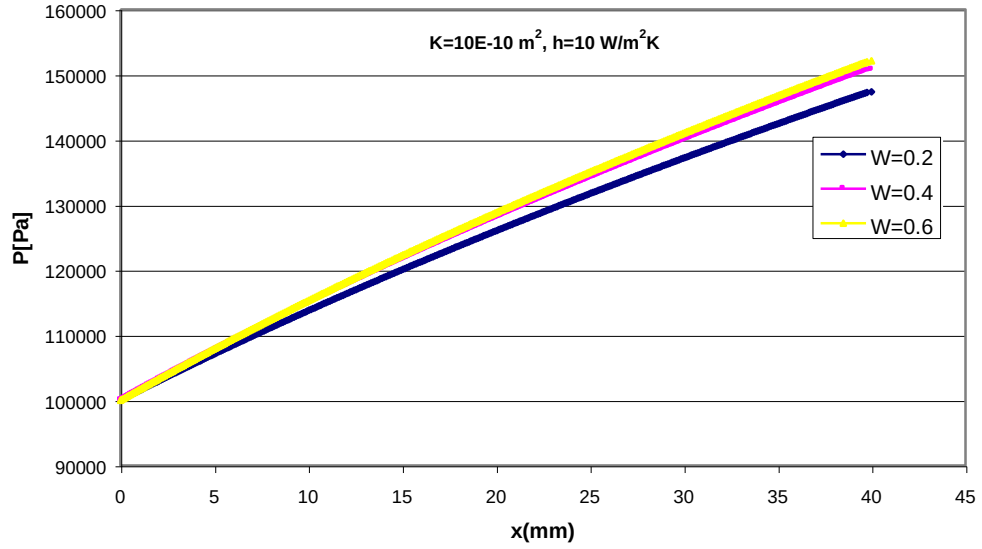


Şekil 4.15a $x=20.05 \text{ mm}$ 'deki basıncın zamanla değişimine kömürdeki nem oranının etkisi

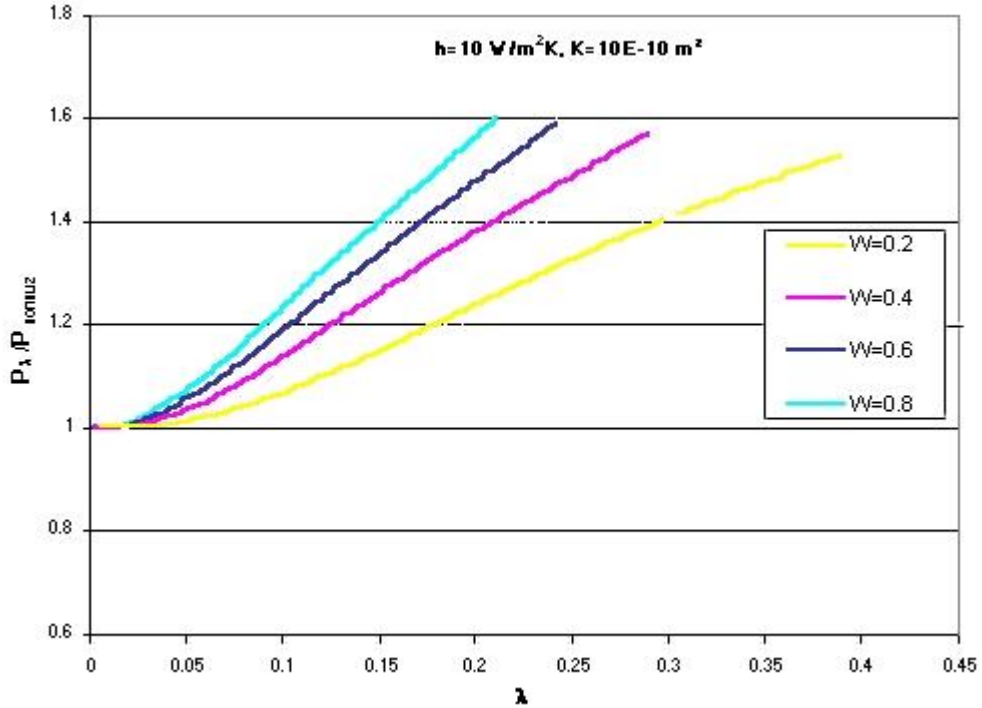


Şekil 4.15b $x=20.05 \text{ mm}$ 'deki basıncın buharlaşma cephesinin konumuna göre değişimine kömürdeki nem oranının etkisi

Şekil 4.15a ve 4.15b nem oranının basınca etkisini değişik nem oranı değerleri için göstermektedir. Buna göre nem oranı arttıkça içeride oluşan basınçlar artmaktadır. Bunun nedeni buharlaşan nem miktarının artması bununla basınç artışına neden olmasıdır.



Şekil 4.16 Kömür içindeki basınç dağılımlarına kömürdeki nem oranının etkisi



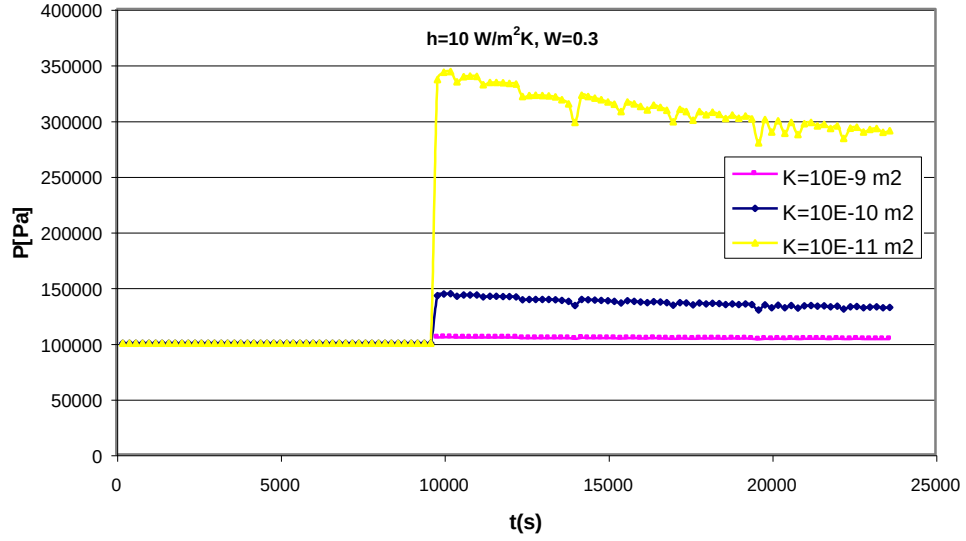
Şekil 4.17 Arayüzeydeki basınçlara kömürdeki nem oranının etkisi

Şekil 4.16'da buharlaşma bitiminde kömür içindeki basınç dağılımlarına nem oranının etkisi görülmektedir. Nem oranı arttıkça basınçlar artmaktadır.

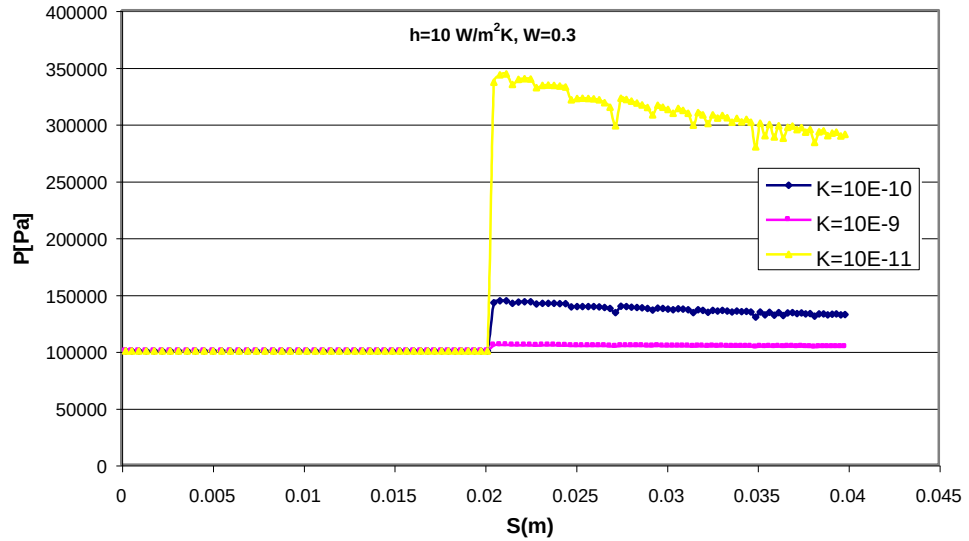
Şekil 4.17 ise arayüzeyde oluşan basınçlara nem oranının etkisini göstermektedir. Görüldüğü gibi nem oranı arttıkça buharlaşma cephesinin ilerleme hızı azalarak kuruma süresi artmakta, fakat ulaşılan maksimum basınçlar da buharlaşan nem miktarı fazla olduğundan artmaktadır.

4.2.3 Kömür Geçirgenliği'nin Basıncı Etkisi

Kömür geçirgenliği azaldıkça buhar katı ortamındaki akışı sırasında daha çok dirence maruz kalmaktadır. Bu yüzden oluşan basınçlar artmaktadır.

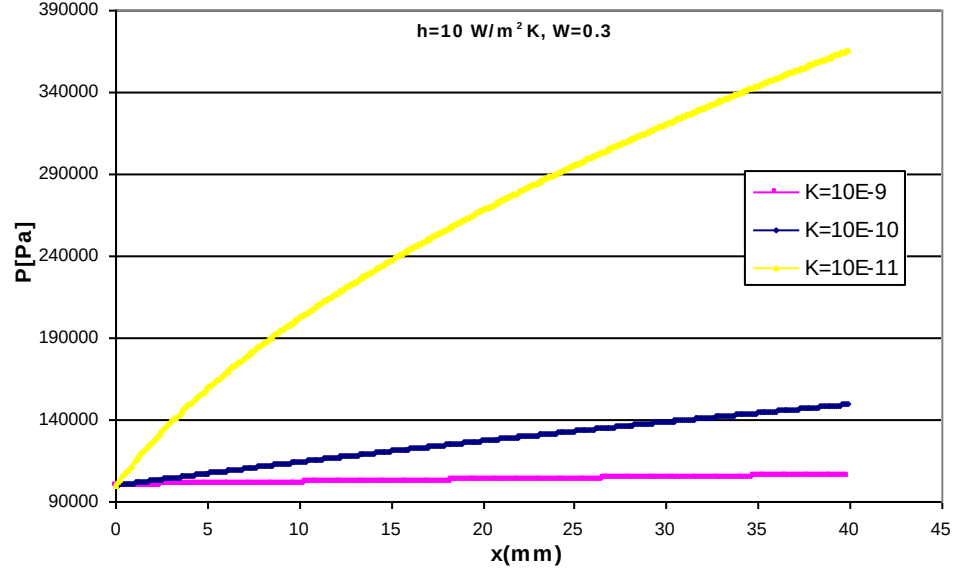


Şekil 4.18a $x=20.05 \text{ mm}$ deki basıncın zamanla değişimine kömürün geçirgenliği'nin etkisi

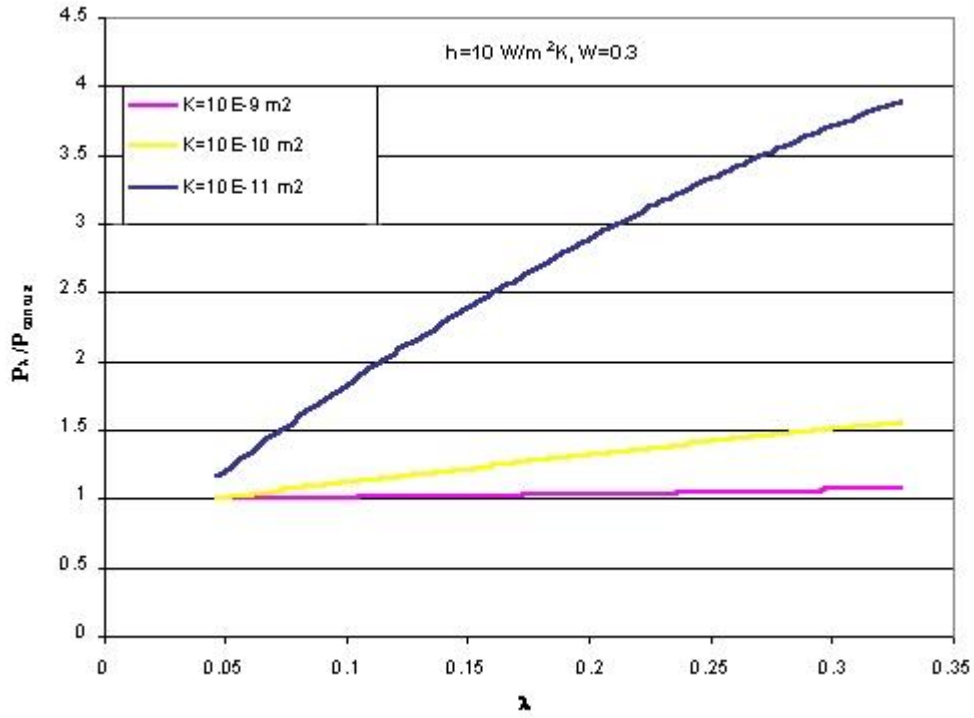


Şekil 4.18b $x=20.05 \text{ mm}$ deki basıncın buharlaşma cephesinin konumuna göre değişimine kömürün geçirgenliği'nin etkisi

Şekil 4.18 $x=20.05 \text{ mm}$ deki basınca kömür geçirgenliği'nin etkisini göstermektedir. Buna göre büyük geçirgenlik halinde (10^9 m^2) buharlaşma cephesi ilerlerken bu noktadaki basınç çok yavaş değişmektedir.



Şekil 4.19 Kömür içindeki basınç dağılımına kömür geçirgenliğinin etkisi

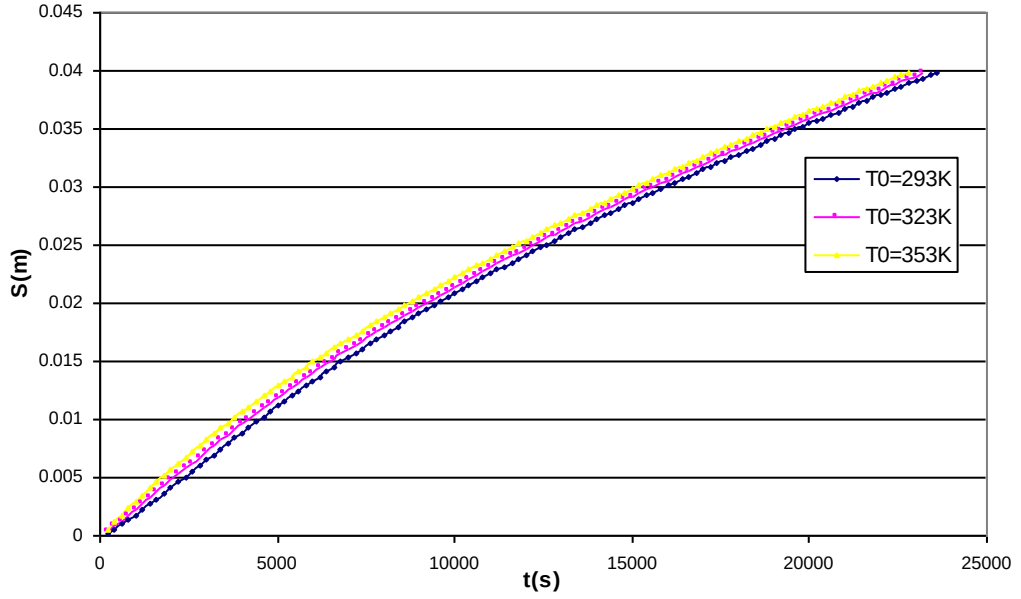


Şekil 4.20 Arayüzeydeki basınçlara kömür geçirgenliğinin etkisi

Şekil 4.19 Kurutma bitiminde kömür içinde oluşan maksimum basınca kömür geçirgenliğinin etkisini göstermektedir. Oluşan basınçlar kömür geçirgenliği azaldıkça buhar daha çok dirence maruz kaldığından artmaktadır. $K=10^{-11}$ m² kömür geçirgenliği için bu değer başlangıç basınç değerinin 3.5 katına çıkmaktadır.

Şekil 4.20'da ise arayüzeydeki basınçlara kömür geçirgenliğinin etkisi gösterilmektedir. Kömürün geçirgenliği arttıkça oluşan basınçlar azalmaktadır.

4.2.4 Başlangıç Sıcaklık Şartının Buharlaşma Cephesinin İlerleme Hızına Etkisi



Şekil 4.21 Başlangıç sıcaklık şartının buharlaşma cephesinin ilerleme hızına etkisi

Şekil 4.21 Başlangıç sıcaklık şartının buharlaşma cephesinin ilerleme hızına etkisini göstermektedir. Görüldüğü gibi başlangıç sıcaklık şartının buharlaşma cephesinin ilerleme hızına çok fazla etkisi olmaktadır.

4.3 Sonuçlar

Kömürün yanma öncesi evresinde içindeki sıcaklık ve basınç dağılımlarına etki eden parametrik incelemelerin sonuçları,

1. Sıcaklıklara, ortamın ısı taşıma katsayısı ve kömürdeki nem oranının,
2. İçinde oluşan basınçlara ise ortamın ısı taşıma katsayısının, kömürdeki nem oranının ve kömürün geçirgenlik değerinin etkili olduğunu göstermektedir.

Bu sonuçlar daha önce yapılan deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında göz önüne alınan parametrik değerler için Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'ten de görülebileceği gibi içeride oluşan basınçları maksimum yapan kritik bir nem oranı değerinin görüldüğü saptanmıştır. Sayısal çözüm sonuçlarına göre kömürün geçirgenlik değeri ve ortamın ısı taşıma katsayısı basınçlara nem oranından daha fazla etkili olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Sondreal, E A and El man, R C**, 1974. Laboratory Determination of Factors Affecting Storage of North Dakota Lignite, Report of Investigation No. 7887, Bureau of Mines, USA
- [2] **Agarwall, P K and Pedler I.**, 1986. Drying Devolatilization and Volatile Combustion for Single Coal Particles: Pseudo-Steady State Approach, *Fuel*, 65, 640-645.
- [3] **Prins, W**, 1987. Fluidized Bed Combustion of a Single Carbon Particle, *PhD Thesis*, Twente.
- [4] **Gauger, A W**, 1932. Condition of Water in Coal of Various Rank, *Trans. of TAI MA*
- [5] **Eki ci, M**, 2000. Kömürdeki Nem in Verim ve Emisyonu Eki si, *Etirne Tezi*, İstanbul.
- [6] **Lui kov, A V**, 1973. Systems of Differential Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 18, 1-14
- [7] **Van Brakel, J**, 1980. *Mass Transfer in Convective Drying*, Advances in Drying Vol 1, pp. 212-245, Ed. Mujumdar, A S, Hemisphere Publishing Corporation, New York
- [8] **Gibson, R D, Cross, M and Young, R W**, 1978. Pressure Gradients Generated During the Drying of Porous Shapes, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 22, 827-830.
- [9] **Incropera, F P and De Witt, D P**, 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer,
- [10] **Cross, M, Gibson, R D and Young, R W**, 1978. Pressure Generation During the Drying of a Porous Half-Space, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 22, 47-50.

- [11] **Patankar, S. V.**, 1980. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow Hemisphere Publishing Corporation, New York

ÖZGEÇMİŞ

Neslihan Akbaba, 1977 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 1995 yılında İ. T. Ü. Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'ne girdi ve 1999 yılında mezun oldu. 1999 yılında İ. T. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Programı'nda Yüksek Lisans öğrenimine ve İ. T. Ü. Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Termodinamik ve Isı Tekniği Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevliliği görevine başladı. Halen bu görevde bulunmaktadır.